冰冻圈物理研究的新视野

任贾文

1 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000
2 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100049

摘要 冰是冰冻圈核心物质，但不同冰冻圈要素因冰的含量及其他物质组成有所不同，物理性质及各种物理过程存在明显差异。经过20世纪中后期对冰的物理性质的大量实验研究和冰冻圈主要要素物理特征的广泛调查，冰的物理性质和冰冻圈主要要素物理特征的基本概念得以明确。随着冰冻圈科学体系的建立和服务于社会经济发展的需要，冰冻圈物理研究在3个方面要着力发展：（1）提高冰和冰冻圈要素物理性质的定量刻画精度，为过程模拟、冰冻圈灾害防治和冰冻圈服务提供关键参数支持；（2）加强冰冻圈主要要素综合物理过程的模拟研究，特别是要开展实体和相似性模拟实验；（3）推进冰冻圈多模式及其与其他圈层模式的耦合研究。

关键词 冰冻圈物理，冰物理学，水热和动力学过程，冰冻圈模拟

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200302001

冰冻圈物理研究旨在探究冰冻圈各要素的物理性质、冰冻圈各要素形成与演化，以及冰冻圈与其他圈层相互作用等诸多过程中的物理机制，为冰冻圈科学研究的各个方面提供理论支撑；冰冻圈物理研究是冰冻圈科学基础研究的核心，贯穿于冰冻圈科学研究的各个方面①。

冰冻圈要素种类较多，包括冰川（含冰盖）、冻土、积雪、河冰和湖冰、海冰、冰架、冰山、海底冻土，以及大气中的固态水等。这些冰冻圈要素因其物质组成、形成和发育条件、演化过程等存在差异，其物理性质和各种过程的物理机制有所不同。另外，过去长时期内冰冻圈各要素的研究都是相对独立发展，研究历史不尽相同，发展也不平衡。

随着冰冻圈科学体系的建立[1]，不仅要系统性地从圈层整体出发开展冰冻圈物理研究，也要对各个冰冻圈要素的物理过程继续深入研究，研究内容十分广泛，不同研究内容的时空尺度和精细程度也有很大差异。因此，有必要根据学科发展的动态和国家重大需求，对冰冻圈物理研究的发展给予一些梳理和思考。

资助项目：国家自然科学基金创新群体项目（41121001），国家自然科学基金重大项目（41690140）
修改稿收到日期：2020年3月27日

① 任贾文. 冰冻圈物理学. 北京：科学出版社，待出版.

1 冰冻圈物理研究的发展

所有冰冻圈要素中的核心物质是冰，了解冰的各种物理性质是探究冰冻圈各要素物理过程的基本前提。因此，可从冰物理学和冰冻圈各要素物理学两方面简略概述冰冻圈物理研究的发展过程。

1.1 冰的基本物理性质

自古以来，人们对自然界广泛存在的冰和雪并不陌生，尽管冰的一些奇妙特性一直吸引着人们的兴趣，但对其基本物理性质的认识长期停留在肉眼观察和表观感知上。

近百年来，随着精密仪器和实验技术的迅猛发展，冰因其特性在许多领域的应用迅速增长，如冰冻圈科学、大气科学、地质和地球物理学、冰工程学、低温生物学等，冰的微观结构和物理性质的相关研究也得到了快速发展。20世纪早期的实验观测明确了自然界中的冰为六方晶体物质，冰在某些方面的性质与其他晶体物质（如某些金属和矿物等）具有一定程度的相似性。20世纪40年代后期，冶金学和材料力学等研究方法的引入，使得对冰的物理性质和力学特性的实验研究得以广泛开展。到20世纪50年代末，研究人员已明确了冰的基本力学特性，揭示出冰虽然作为固体具有刚体脆性，但在高温下（自然界的冰都较为接近熔点）尽管还有一定的弹性，其塑性特征却是最主要的，且主要变形属于蠕变范畴，可表述为幂函数蠕变规律。与此同时，对冰的其他物理性质的实验观测也大量开展，到20世纪60—70年代，研究人员对冰的各种物理性质已经有了大致了解，这奠定了冰物理性质的基本概念[2]。

冰的物理性质受多种因素的影响，如温度、受力状况、杂质成分和含量，以及冰的结构（如组构特征、晶粒尺寸、密度、气泡等）等。如果是巨大冰体，这些影响因素往往在空间上不均一，在时间上也有变化；因而，对各种各样冰体物理性质的现场观测和实验研究一直在持续探索中。这使得冰的物理性质的基本概念不断完善，各种类型冰的实验观测数据也得以不断丰富。

1.2 冰冻圈主要要素物理特征研究

由于冰冻圈不同要素的主要物理过程不尽相同，对其物理特征的研究重点也有差异，但总体上主要以水-热和动力过程为主。

*（1）冰川物理特征研究。①在冰川动力学方面。*就冰川来说，冰体流动及其相关过程是最为核心的内容。因此，19世纪以前就已有对冰体流动机理的探索。然而，由于对于冰的微观结构和流变特性的认识不是很清晰，关于冰川运动的机理长期处于各种假设和争论中。直到20世纪中期，冰的蠕变规律的大量实验结果涌现以后，研究人员才对冰川的流动机制有了一致的认识，建立了冰体在自重作用下的蠕变变形和当底部温度达到或接近熔点时的滑动运动的基本理论。由于冰的真实变形规律为幂函数，在冰川运动模拟中的数学处理非常困难，因此用理想塑性体或黏性流体近似描述冰体变形也比较普遍。*②在冰川热力学方面。*冰川热力学研究也有较长历史，起初主要以温度场描述开展，后来则是伴随冰川动力学研究将其耦合到冰体动力学模拟研究中，冰川表面能量平衡和物质平衡也由统计经验模式向物理模式、由单点向分布式模式发展[3]。

*（2）冻土物理特征研究。*冻土物理特征的重点是土壤冻融过程中水-热输运的耦合机制和冻土力学特性。相比于冰川研究，冻土研究历史较短，尤其是冻土区工程相关问题研究于20世纪中后期才迅速发展起来。水-热耦合作用是冻土学研究的核心科学问题，主要因为水分迁移和相变对温度起着决定性影响，温度及其梯度又直接影响土壤水分迁移及相变。冻土力学既是冻土物理学的主要内容之一，又是冻土学的一个重要分支，因其是处理冻土工程问题的基础，一直受到格外重视。由于冻土的物质组成极为复杂多样，正冻土和正融

土中的水-热过程也伴随着力学过程，从而引起土体的冻胀和融沉。因此，水-热-力三场耦合成为了冻土研究的本质问题。又因为土体中和水分中常含有盐分，盐分介入对水-热-力三场耦合作用机制具有极大影响，从而也影响着土体的冻胀和融沉，于是近年来水-热-力-盐四场耦合问题受到关注。冻土物理特征的研究更多依赖于实验室各种土体样品的观测和实验。

（3）积雪物理特征研究。积雪物理特征研究常常与气象学和水文学联系在一起。因为积雪的存在改变了地表作为大气下垫面的特性，特别是雪面的高反照率对地表能量平衡有重要影响，而积雪融化又是地表水文过程的一个重要方面。积雪物理特征研究的重点是不同类型积雪变化过程中的各种物理特性定量描述、雪的粒雪化过程、在温度梯度作用下雪层内水汽迁移及再冻结、深霜及雪板的形成、雪的光学性质和积雪融化等。受监测手段制约，早期的研究以积雪的主要物理特性和变化特征的定性描述和分类居多，随着遥感应用及数值模拟的发展，积雪的能量和质量迁移模式不断优化。

（4）海冰物理特征研究。海冰的物理特征研究历史也较短，可分为2个方面。① 大范围海冰（主要是北极海冰和南极海冰）的形成和演化过程的物理机制。重点描述海冰相关的物理参数分布，为建立海冰模式和预测其变化服务。其中，北极海冰研究历史相对较长，但也基本在百年以内，这方面研究中热力学内容占的比重较大，主要基于能量平衡和物质平衡来开展。较早研究因受实地监测资料限制，对某个参数的分散研究较多。20世纪90年代初以来，随着遥感应用的发展，大范围多参数实时监测资料迅速丰富，对海冰各种物理参数和相关过程的系统研究快速发展。② 针对海冰工程问题的物理特性研究。以冰力学为主要内容，实验研究较为突出。这方面研究因主要针对港口等具体工程问题，相对比较分散。

（5）河冰物理特征研究。主要针对河冰的形成、融化解体及冰凌问题，以冰的热力学和河流水力学的耦合为重点。相比于冰冻圈其他要素，河冰物理研究历史较短，针对工程和灾害的研究特点比较突出。相对来说，北美的研究历史较长，但也主要是20世纪中期以后才发展起来。

概括来说，20世纪中后期是冰物理和冰冻圈物理过程研究迅猛发展的时期，冰的基本物理性质和冰冻圈各要素物理过程的基本概念得以大致明确。早期冰冻圈各要素研究相对比较独立，21世纪以来冰冻圈多要素综合研究得到重视。

2 冰冻圈变化及其影响的研究亟待物理学过程精细化研究的支持

在冰冻圈科学研究中，冰冻圈如何变化及其会产生怎样的影响是最受关注的科学问题。冰冻圈的模拟和冰冻圈与其他圈层相互作用的模拟，决定了对冰冻圈变化及评估其变化所产生影响的预测，而这些模拟研究的基础就是对冰冻圈所涉及的各个物理过程的描述。对冰冻圈相关物理过程描述的准确性和精细程度决定着模拟结果的可靠性，因此冰冻圈物理研究在支持冰冻圈变化和影响模拟方面的发展需要重点加强。

2.1 冰冻圈物理参数的获取能力亟待提升

深入理解冰冻圈物理过程和模拟研究，需要全面、系统的监测数据，足够长的监测时间，以及更高的监测效率和数据共享能力。① 完善地面监测网络。在现有监测网络基础上，完善监测地点布局，优化监测设备和数据采集系统，提高地面监测能力。② 发展自主遥感和空基监测手段。研发和搭载冰冻圈卫星遥感传感器，同时研发和应用航空监测技术，提升空-天监测能力。③ 提高数据传输和数据库应用能力。发展并建立地面监测数据传输系统，建立遥感和航空监测数据融合系统；通过大数据和云计算等新技术的应用，加速研发数据产品，达到数据共享，提高对冰冻圈物理学过程和模拟研究支持的效率。

2.2 冰冻圈实验室建设及研究亟待系统性加强

（1）实验室研究是冰冻圈物理学研究中至关重要的环节。通过实验室内的样品测试和模拟实验等一系列研究，可达到精确测量某些重要物理参数、观察重要的物理过程、揭示某些参数之间相互影响等方面的目的。实验室研究在科研条件上需要很大的经费投入，如建造实验室、建立各种实验环境控制系统、配备相关的仪器设备等；因此，目前冰冻圈实验室主要以小型和分散的实验研究为主，侧重于对样品某些物理参数的测定和单一物理过程的实验观测。由于自然界的冰冻圈变化是各种物理过程综合作用的结果，通过实验室人为控制环境条件来考察 2 种或多种物理过程，揭示几种重要物理过程之间的相互影响，对建立冰冻圈模拟耦合模式十分必要。因此，需要加强实验室建设，特别是要着力发展实体模拟实验和相似性模拟实验研究。

（2）实体模拟实验室是冰冻圈实验室研究的发展目标之一。实体模拟实验可以是单个目标或单个参数的模拟实验，如风吹雪的起动和运动实验、静态水和流动水体结冰实验等；也可以是具有一定综合性特征的实验，如冻土冻胀-融沉及变化过程实验、不同形式河冰与水流相互作用实验等。这类实验研究的特点是能够在人为控制条件下真实再现需要研究的物理过程，以便建立比较准确的有关参数之间的定量关系。由于在室内很难将一个完整的冰冻圈要素或者很大一部分实体再现，建造与自然状态具有相似性的模拟体进行观测研究是实验室研究的发展目标之一。比如，要精细地了解冰川、海冰和河冰等运动过程，可以在室内按几何相似和物理相似原则建造相似性模型，通过人为控制坡度、水流、压力、温度等条件进行相似性样本运动过程观测。

2.3 冰冻圈多模式以及与其他圈层模式的耦合研究需紧密结合

如前所述，冰冻圈变化及其影响是多种物理过程的综合体现，因而对其研究迫切需要多模式耦合以提高冰冻圈变化和影响的定量化水平。

在冰冻圈自身的模拟方面，能量-物质平衡、力学-动力学与热力学过程、水分迁移和热量传递等许多过程都是相互影响的；因此，要准确地描述某一个过程，必须要考虑与之密切相关的另外过程。例如，对冰川运动来说，温度不仅是冰的蠕变变形中至关重要的参数，也决定着冰川底部的运动和动力学条件，而冰的应变和冰体滑动又会产生热量从而改变温度；因此，要想很好地描述冰川动态变化，就需要将冰川动力学模式与热力学模式耦合起来。物质平衡是冰川变化的驱动因子，要获得比较准确的物质平衡时空变化，必须依赖分布式能量-物质平衡模式；冻土中的水和热更是密不可分，发展水分迁移和热量传递的耦合模式研究是冻土模式研究的核心，而冻土的力学问题也与冻土水-热过程密切相关；积雪变化不仅涉及能量平衡，还涉及到融水下渗和流失等过程；海冰消长虽取决于表面和内部的能量-物质平衡过程，但与海水之间的相互作用也极为重要。

由于冰冻圈是在气候环境等条件变化的驱动下发生变化，反过来其变化又影响气候、水文、生态等，在冰冻圈变化和影响研究中，必然要将冰冻圈与其他圈层的模式研究进行耦合。过去长时期内，一方面冰冻圈各要素模式发展不平衡，另一方面因冰冻圈与气候系统其他圈层的模式研究在时空尺度和分辨率上不够匹配，冰冻圈模式与其他圈层模式研究的耦合进展缓慢。因此，未来需要将冰冻圈模式研究与其他圈层模式研究紧密结合，促进冰冻圈变化及其影响研究的发展。

3 加强冰冻圈物理研究是推进冰冻圈灾害和服务研究的关键

冰冻圈科学发展的一个重要方向是将冰冻圈研究与社会经济发展紧密结合，为解决国家重大需求和地

方的可持续发展服务。依据我国冰冻圈分布状况及其影响区域，以及国家对冰雪运动产业的需求，近期内冰冻圈物理研究应主要针对冰冻圈灾害防治和冰冻圈服务来开展。

3.1 冰冻圈灾害物理机制和防治措施技术研究

冰冻圈灾害种类繁多，分布广泛。在气候变暖背景下，冰冻圈快速变化特征明显，冰冻圈灾害频发的风险和影响日趋严重。特别是近年来冰川跃动、冰崩、冰湖溃决、洪水、冰川泥石流、多年冻土滑塌等造成的危害剧增；风吹雪和雪崩、冰冻雨雪及暴风雪、河流冰凌等灾害也引起更多关注。目前，对这些灾害分布的调查、危险性评估和风险管控研究虽已有开展，但仍缺乏对可采取的工程防治措施的研究。随着冰冻圈灾害发生概率的加剧，相关工程防治措施将成为必要的选择。为此，应当针对冰冻圈灾害发生的机理、工程措施中的关键物理参数、灾害过程模拟和工程效率实验等开展系统研究，为灾害的防治提供基础科学支撑。

3.2 冰冻圈服务——冰雪体育和冰雪旅游产业中的冰雪物理研究

冰雪体育和大众冰雪娱乐活动是以冰雪为界面的第三产业新兴产品，属于冰冻圈人文服务。不同类别的冰雪产业对冰雪物理性质具有不同的要求。我国冰雪资源丰富，冰雪体育和冰雪旅游产业的发展具有广阔前景。尤其是以 2022 年北京冬季奥林匹克运动会为契机，推动我国广大民众参与冰雪体育和发展冰雪旅游产业已成为全社会的共识。目前，以滑雪场建设为标志的冰雪体育和旅游产业已蓬勃兴起，全国已建成运营的滑雪场达上千个，还有更多滑雪场正在筹建或计划中。但是，与国外相比，我国单个滑雪场的规模、质量、运营效率都普遍低下，特别是雪道和雪质不够规范。从体育赛事角度来看，作为我国雪上运动训练基地的历史较长的东北地区某些滑雪场，甚至是北京冬奥会张家口赛区滑雪场，在如何使雪道和雪质满足要求、保证赛事圆满也存在挑战。因此，需要开展冰雪物理基础研究以为其提供科学支撑，主要研究内容包括：不同温度、湿度和压力（包括风速）等组合条件下雪粒的形成，粒径、密度、水分和硬度等的变化，雪层内部黏聚力和表面摩擦特性，风雪流和雪雾的影响，人造雪技术指标，以及不同规模储雪技术等。如有必要，还可以开展滑冰场建设和维护中的有关冰物理参数方面的研究。

4 结语

20 世纪中后期是冰冻圈物理研究迅速发展的时期，冰的基本物理性质和冰冻圈各要素主要物理特征的基本概念得以确定。20 世纪末以来，冰冻圈对气候环境的重要作用使气候学成为冰冻圈研究的主线，专门的冰冻圈物理研究开展较少。目前，随着冰冻圈科学体系的构建，冰冻圈变化及其影响的定量研究，以及冰冻圈为社会经济发展服务等多个方面都迫切需要对冰冻圈物理过程给予更深入的研究，某些研究内容更需要进一步明确冰和雪的微观物理性质和相关过程。可以说，冰冻圈科学的发展和人类社会可持续发展的需求对冰冻圈物理研究提出了新的要求。冰冻圈物理研究近期主要发展方向为：着力提高监测技术和数据获取能力，开展实验室实体和相似模拟研究，发展多圈层耦合模式，以及进一步开展冰和雪微观物理过程精细化研究等。

参考文献

1 秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2018.

2 Hobbs P V. Ice Physics. Oxford: Clarendon Press, 1974.

3 Cuffey K M, Paterson W B S. The Physics of Glaciers. Amsterdam: Elsevier, 2010.

New Perspective of Research on Cryospheric Physics

REN Jiawen

(1 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Ice is the core material in cryosphere, while the physical properties as well as physical processes of cryospheric components vary obviously because of difference in ice proportion and other material compositions. A large number of laboratorial studies and extensive field investigations in the middle and late of 20th century have determined the basic concepts of ice physical properties and the outlines of physical characteristics of these cryospheric components. With establishment of the cryospheric science system and requirement of the socio-economic development, research emphasis of cryospheric physics should be put on three aspects in future. One is further investigation of ice physical properties in details in order to provide accurate parameters for modelling, disaster prevention, and cryospheric service. Another is the laboratory simulation of combined processes of the cryosphere, especially entity and similarity simulations. The third is to promote the coupling between cryospheric models and further between models of cryosphere and other spheres.

Keywords cryosphere physics, ice physics, hydrothermal-dynamic process, cryosphere modeling



任贾文 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员、博士生导师。主要从事冰川学和冰冻圈与气候环境变化研究，主要研究方向为冰川物理学。E-mail: jwren@lzb.ac.cn

REN Jiawen Professor of Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, He has long been engaged in research on glaciology and cryosphere and climate changes with main focus on glacier physics. E-mail: jwren@lzb.ac.cn

■责任编辑：张帆